

# Proposition de sujet de thèse 2022

(A remplir par les équipes d'accueil et à retourner à Isabelle HAMMAD : [hammad@cerege.fr](mailto:hammad@cerege.fr)  
\*à renseigner obligatoirement pour la validation du sujet, (1) : A remplir lors de la campagne d'attribution des allocations, à l'issue de la session de juin des Masters

## Sujet de doctorat proposé \*:

Encadrant(s), nom, prénom, adresse mail \*: **Christelle Claude**

Laboratoire \*: CEREGE

## Tableau récapitulatif du sujet

<b>Candidat(e)</b> (1)	
Nom - Prénom :	
Date de naissance :	
Licence (origine, années, mention) :	
Mention et classement au Master 1 année (Xème sur Y)	
Mention et classement au S3 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au S4 du Master 2 (Xème sur Y)	
Mention et classement au M2 (année) (Xème sur Y)	
MASTER (nom, université)	
<b>Sujet de doctorat proposé*</b>	
Encadrants (2 max, indiquer si HDR ou pas)*	<b>CLAUDE Christelle</b>
Laboratoire*	<b>CEREGE</b>
Programme finançant la recherche (indiqué si obtenu ou envisagé) (1)	Obtenu : APIC CEREGE (équipement prélèvement concrétions et spéléothèmes), ARKAIA (AQUEDAIX) (analyses) Envisagé : Mairie de Fréjus (terrain et analyses) ; Agence de l'eau (analyses);

## Sujet de doctorat proposé\*

Intitulé\* :

**Les concrétions carbonatées des ouvrages hydrauliques de l'époque romaine, archives archéologiques et environnementales pour une reconstitution paléo-hydrologique (exemples des cités d'Aix-en-Provence et de Fréjus).**

Descriptif \*:

### Contexte :

Dans les villes antiques du pourtour méditerranéen, la gestion de l'eau est un aspect important de l'implantation des villes, de leur structuration et de leur fonctionnement. Rares sont les sociétés grecques, puis romaines, qui ne s'installent pas à proximité d'une source, d'une nappe phréatique ou d'un fleuve dont elles tireront éventuellement l'eau par le moyen d'aqueducs. L'urbanisme et l'architecture hydraulique ont laissé de

nombreux témoignages encore bien conservés. Parallèlement, le cadre climatique est un des paramètres clés étroitement associé à la gestion de la ressource en eau de ces sociétés passées, mais mal connu.

**État de l'art :** L'étude de ces installations a été largement développée tout particulièrement pour le monde romain, et concerne notamment l'architecture et la technologie des aqueducs, symboles de la civilisation romaine (Malissard 2002). En revanche, l'analyse du cadre environnemental a commencé tardivement, et d'abord dans un cadre disciplinaire. Bon nombre d'historiens ont utilisé les textes littéraires antiques (Panessa 1991) ou les données d'archives (Guidoboni 2010) et ont dressé un tableau très partiel de l'histoire climatique de la Méditerranée historique. Quelques pionniers ont initié des études interdisciplinaires (Leveau et Provansal 1993). Lamb (1977) propose que le réchauffement climatique général observé entre le I<sup>er</sup> s. avant et II<sup>ème</sup> siècle ap. notre ère soit un élément clé de l'expansion romaine (« Optimum climatique romain »). A la lumière de données climatiques récentes, Berger et Bravard (2012) rediscutent ces aspects, en étudiant le rôle de crises hydro-sédimentaires majeures en Narbonnaise et en Gaule chevelue survenues à cette période, traduisant cependant un climat instable avec de courtes phases plus fraîches et plus humides. Le caractère anormal de ces événements par rapport au fonctionnement climatique régional et global est en cours d'étude.

Les aqueducs, et autres ouvrages hydrauliques, renferment souvent des concrétions carbonatées, témoins de leur utilisation passée. Ces concrétions sont laminées comme les spéléothèmes, archives paléo-environnementales reconnues. Plusieurs études montrent que l'interprétation lamine claire/lamine sombre formant un doublet peut être complexe, en relation avec la cristallographie de la calcite, la quantité de matière organique, la couleur, la porosité et la composition chimique et isotopique de l'air et de l'eau (Zhang et al., 2008). Cependant dans le cas des concrétions carbonatées d'aqueducs, les travaux semblent indiquer que cette alternance peut s'interpréter plus facilement : lamine claire à croissance optimale en saison pluvieuse et lamine sombre à petits cristaux, irréguliers, souvent multiples, en saison sèche (Bobée et al., 2010). Ainsi, la croissance de l'épaisseur des lamines serait fonction de la quantité d'eau et/ou de la durée de la saison et chaque doublet de lamines pourrait être décompté comme des varves ou comme des cernes de bois. Les régions méditerranéennes étant caractérisées par un climat fortement contrasté, l'association saison humide/saison froide et saison sèche/saison chaude est suggérée. Les travaux très récents de la littérature sur ce sujet soulignent le caractère innovant de cette recherche (Sürmelihiindi et al., 2013, Passchier et al., 2016, Benjelloun et al., 2019). Cependant, la chronologie absolue, indispensable tant du point de vue archéologique qu'environnementale est peu développée.

**L'objectif général** de la thèse est l'étude des aqueducs et autres ouvrages hydrauliques à partir de l'étude géochimique des dépôts carbonatés qui s'y sont déposés, tous relevant d'une chronologie analogue, les deux premiers siècles de notre ère. La thèse portera sur deux cités romaines majeures « Forum Julii » (Fréjus fondée vers 49 avant JC) et Aquae Sextiae (Aix-en-Provence, fondée en 124 avant JC). Les premiers travaux entrepris sur l'aqueduc de Traconnade à Aix-en-Provence ont montré la faisabilité de la démarche scientifique, en particulier sur la capacité à établir le lien génétique entre les carbonates déposés et l'origine de l'eau transitant dans l'aqueduc. L'étude paléo-environnementale sera renforcée par l'étude de spéléothèmes provenant d'un 3<sup>ème</sup> site à mi-chemin entre Aix-en-Provence et Fréjus, offrant à la fois un cadre régional à l'étude et une archive située en dehors de toute influence anthropique. Cette thèse aura donc deux objectifs principaux complémentaires : 1) établir la connexion entre les différents ouvrages hydrauliques au cours du développement de la cité (segments d'aqueducs appartenant au même tracé ? période de fonctionnement ? origine de l'eau transportée ?) ; 2) caractériser les conditions environnementales au I et II<sup>ème</sup> siècle (températures et précipitations).

### **Les sites étudiés seront les suivants :**

Les deux cités romaines sujets de l'étude sont Aix-en-Provence et Fréjus en Narbonnaise.

À Aix-en-Provence, les pénuries occasionnées lorsque les réserves d'eau du karst étaient épuisées et l'évolution de la ville, marquée par l'érection d'établissements thermaux publics sont probablement à l'origine de la multiplication des aqueducs (trois en tout, alimentés par 3 sources différentes) dont on ignore cependant la date d'édification, l'ordre de succession et la durée de fonctionnement. Sur les trois, l'aqueduc de la Traconnade est le plus important et le plus remarquable des aqueducs d'Aix-en-Provence. Ces témoins du fonctionnement de cet aqueduc n'ont pas permis jusqu'ici d'estimer la durée de son fonctionnement. Par ailleurs, les restes

archéologiques de ces aqueducs sont discontinus et pas toujours facilement identifiables sur le plan archéologique (Fino et Fuhry, à paraître). A Aix-en-Provence, outre l'intérêt que représentent les dépôts carbonatés en termes d'archives paléo-environnementale, la comparaison des différents carbonates permettra de préciser le tracé des différents aqueducs.

A Fréjus, il n'y a qu'un seul aqueduc connu dont le tracé N-S est bien identifié et qui présente d'importantes concrétions (Gébara, Michel 2002). Il est à la fois le symbole de la puissance de la cité et de sa romanité. Deux principales sources d'eau aux faciès chimique très contrasté ont été utilisées successivement (La Foux et La Siagnole) pour ravitailler la cité. Avant son installation dans le courant de la deuxième moitié du I<sup>er</sup> s. apr. J.-C. les sources d'approvisionnement en eau douce étaient assurées par des citernes et des puits. Par ailleurs, il existe plusieurs ouvrages hydrauliques associés au développement de la ville romaine (moulin, citernes, collecteurs, tuyaux d'adduction) au sein desquels se sont déposées des concrétions carbonatées dont il est nécessaire d'établir la chronologie ainsi que les liens génétiques avec l'aqueduc ou d'autres sources d'approvisionnement possible, comme la nappe phréatique, les précipitations. Sur le plan paléo-environnemental, des niveaux sédimentaires semblent témoigner de fortes intempéries à l'origine de crues entre le I<sup>er</sup> s. avant et le I<sup>er</sup> s. ap. J.-C., dont certains, déposés entre deux phases d'occupations romaines (site de Reydisart (Fréjus) fouille S. Ardisson, rapport en cours). Les travaux récents menés à Fréjus sur la progradation littorale (Excoffon et al. 2010 ; Excoffon, Bonnet 2016), ainsi que les travaux en cours sur la chronologie des aménagements portuaires romains (PCR « le port romain de Fréjus » dir. Excoffon, Botte, Carayon), démontrent une vitesse très importante de l'accumulation de sédiments dans la baie de Fréjus dans le courant du I<sup>er</sup> s. apr. J.-C. Les réflexions en cours nous portent à penser que cette période correspond, à Fréjus en tous cas, mais d'autres secteurs de Gaule Narbonnaise montrent des indices similaires (Berger, Bravard 2012, 276-277), à une crise hydro-sédimentaire importante qu'il est tentant de rattacher, au moins en partie, à une période importante de précipitation.

Afin de renforcer l'étude paléo-environnementale, un 3<sup>ème</sup> site permettant d'étudier des archives carbonatées situées hors de l'influence anthropique, est nécessaire. Au cours des dernières années, l'étude des spéléothèmes a connu une importance grandissante dans la mesure où ils permettent d'obtenir un enregistrement daté radiométrique absolu et apportent des indications sur la densité de végétation, la température et la pluviométrie (taux de croissance), le fonctionnement des systèmes hydrologiques karstiques et la dynamique du sol. Cette approche, qui sera menée en parallèle du travail de thèse sur des stalagmites prélevées sur le versant Nord de la Sainte Baume à mi-chemin entre Aix-en-Provence et Fréjus, pourra servir à renforcer les objectifs de la thèse (si les gammes de temps sont comparables).

**Démarche et laboratoires d'accueil :** le travail de thèse se déroulera principalement entre un laboratoire d'accueil (CEREGE) et la Direction archéologique d'Aix-en-Provence et le Service archéologique de la ville de Fréjus (convention de collaboration signée entre la Ville de Fréjus et le CEREGE). Il s'articulera autour d'investigations de terrain sur les sites d'études : participation aux travaux des équipes archéologiques en charge des fouilles, prélèvements des carbonates et de l'eau. Au laboratoire, les techniques analytiques seront : séparation chimique de l'U et du Th des carbonates en salle blanche, mesure des compositions isotopiques par MC-ICPMS, mesures des isotopes stables de l'eau (O et D) et des carbonates (O et C), du rapport isotopique du Sr de l'eau et des carbonates, cartographie des éléments chimiques en trace par LASER-Ablation-ICPMS.

Ce travail s'articulera autour de deux volets complémentaires :

Volet 1 : Archéologie

- collecte de la bibliographie et état de l'art ;
- investigation sur les sites ;
- analyse des prélèvements sur les sites identifiés ;
- interprétation archéologique des résultats.

Volet 2 : Paléo-environnement : Minéralogie, Géochimie et Hydrogéologie

- Minéralogie : étude des modes de dépôt des concrétions carbonatées par la caractérisation des matériaux.
- Datation absolue des concrétions ; isotopes stables des carbonates et du strontium, à des fins de reconstitutions paléo-environnementales ; caractérisation géochimique à fine échelle (micro-XRF).
- Hydrochimie-Hydrogéologie : analyses chimiques et isotopiques de l'eau d'alimentation des aqueducs et de la nappe phréatique locale et des précipitations.

**Profil, qualités et expériences recherchées :** titulaire d'un M2R en Chimie, Géochimie ou Géosciences de l'environnement, Géologie ou Géographie physique avec une expérience en Sciences de l'environnement.

Rigueur ; capacité d'intégration dans une équipe multidisciplinaire, expériences de terrain et en analyses de laboratoire.

Bibliographie :

Ardisson à paraître: Le reydissart 7, Rapport de fouille préventive, Fréjus, à paraître.

Benjelloun, Y., Carlut, J., Hélie, J-F, Cazot, G., Le Callonnec, L., 2019, Geochemical study of carbonate concretions from the aqueduct of Nîmes (southern France): a climatic record for the first centuries AD?, Scientific Reports, 9 : 5209.

Berger, Jean-François, et Jean-Paul Bravard. « 16. Le développement économique romain face à la crise environnementale : le cas de la Gaule narbonnaise », Jean-François Berger éd., Des climats et des hommes. La Découverte, 2012, pp. 269-289.

Bobée, C., Huon S., Guendon O, Salomon, J., Gébara, C., Michel, J.-M. and Regert, M., 2010, High-resolution (píxe) analysis of carbonate in a roman aqueduct (Fréjus, S.E. France) : implications for the study of paleohydrological variability and water resources management in southern Gaul during the roman period, Archaeometry, doi: 10.1111/j.1475 — 4754.2010.00544.x.

Excoffon, Bonnet 2016 : P. Excoffon, S. Bonnet et C. Tomatis (coll.) L. Ferrer (coll.), S. Ardisson (coll.), N. Bernigaud (coll.), N. Portalier (coll.), C. Morhange (coll.), Restitution de la morphologie littorale et aménagements portuaires de Forum Iulii, in : C. Sanchez, M.-P. Jezegou (dir.), Les ports dans l'espace méditerranéen antique. Narbonne et les systèmes portuaires fluvio-lagunaires, Actes du colloque Les ports dans l'espace méditerranéen antique, Montpellier mai 2014, 2016 (Suppl. RANarb), 339-352.

Excoffon et al. 2010 : P. Excoffon, S. Bonnet, B. Devillers, J.-F. Berger, Évolution du trait de côte aux abords de Fréjus, de sa fondation jusqu'au IIe s. apr. J.-C., du quartier de Villeneuve à la butte Saint-Antoine, in : X. Delestre et H. Marchési (éds.), Archéologie des rivages Méditerranéens : 50 ans de recherches, Actes du colloque d'Arles, 28-30 octobre 2009, Paris, éd. Errance, 2010, 47-53.

Gébara Michel, 2002, L'aqueduc romain de Fréjus : Sa description, son histoire et son environnement, sous la direction de Chérine Gebara et Jean-Marie Michel, en collaboration avec Jean-Louis Guendon. Revue Archéologique de la Narbonnaise, Supplément 33 Montpellier (2002).

Guidoboni F., Navarra A., Boschi E., *Nella spirale del clima. Culture e società mediterranee di fronte ai mutamenti climatici*, Bononia University Press, 2010.

Lamb H.H. (1977), Climate, present, past and future, Methuen, Londres, 2 vol.

Leveau, P., Provansal M., (dir.), Archéologie et environnement : de la Sainte-Victoire aux Alpilles, Aix-en-Provence, 1993.

Malissard, A., Les Romains et l'eau. Fontaines, salles de bains, thermes, égouts, aqueducs, Paris, 2002 [1994].

Panessa G., (dir.), Fonti greche e latine per la storia dell'ambiente e del clima nel mondo greco, I-II, Pise.G.

Passchier, C., Sürmelihindi, G., Spötl, C., Mertz-Kraus, R., Sholz, D., Carbonate deposits from the ancient aqueduct of Béziers, France —A high-resolution paleoenvironmental archive for the Roman Empire, Pal., Pal., Pal., 462, 328-340.

Sürmelihindi G., Passchier, C.W., Spotl, C., Kessener, P., Bestmann, M., Jacob, D.E. and Baykan, O. N., 2013, Laminated carbonate deposits in Roman aqueducts: Origin processes and implications, Sedimentology 60, 961–982.

Fino B., Fuhry M. à paraître, L'aqueduc romain d'Aix-en-Provence/Traconnade, Revue Archéologique de Narbonnaise.

Zhang, P., Cheng, H., Edwards, L., Chen, F., Wang, Y., Yang, X., Liu, J., Tan, M., Wang, X., Lui, J., An, C., Dai, Z., Zhou, J., Zhang, D., Jia, J., Jin, L., and Johnson, K. R., 2008, A test of climate, sun and culture relationships from an d180-year Chinese cave record, Science, 322, 940–2.

## Directeur(s) de thèse proposé(s)\*

Christelle CLAUDE- HDR (HDR obtenue en 2020)

## Directeur HDR proposé\*

Nom - Prénom : CLAUDE Christelle

Corps : Maître de conférences HDR

Laboratoire (i.e. formation contractualisée de rattachement, éventuellement équipe au sein de cette formation) : CEREGE

Adresse mail : [claud@cerege.fr](mailto:claud@cerege.fr)

Choix de cinq publications récentes (souligner éventuellement les étudiants dirigés co-signataires) :

1. Flaux, C., Giaime, M., Pichot, V., Marriner, N., el-Assal, M., Guihou, A., Deschamps, P., Claude, C., and Morhange, C. (2021), The late Holocene record of Lake Mareotis, Nile Delta, Egypt, E&G Quaternary Sci. J., 70, 93–104, <https://doi.org/10.5194/egqsj-70-93-2021>.
2. Claude, C., Cockenpot, S., Arfib, B., Meulé, S., Radakovitch, O. (2019), Accuracy and sensitivity of radium mass balance in assessing karstic submarine discharge in the stratified Calanque of Port-Miou (Mediterranean Sea), Journal of Hydrology 578, 124034.
3. Fakir, Y., Claude, C., ElHicham, H. (2019), Identifying groundwater discharge to an Atlantic coastal lagoon (Oualidia, Central Morocco) by means of salinity and radium mass balances, 2019, Environmental Earth Sciences 78 (21), 626.
4. Cockenpot S., Claude C. and Radakovitch O. (2015), Estimation of air-water-gas exchange coefficient in a shallow lagoon based on 222Rn mass balance. Journal of Environmental Radioactivity, 143, 58-69.
5. Baudron P., Cockenpot S., Lopez-Castejon F., Radakovitch O., Gilabert J., Mayer A., Garcia-Arostegui J.-L., Martinez-Vicente D., Leduc C., Claude C. (2015), Combining radon, short-lived radium isotopes and hydrodynamic modeling to assess submarine groundwater discharge from an anthropized semiarid watershed to a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain). Journal of Hydrology, 525, 55–71.

**Thèses encadrées ou co-encadrées au cours des quatre dernières années\***

Nom : **aucune**

Intitulé :

Type d'allocation :

Date de début de l'allocation de doctorat :

Date de soutenance (si la thèse est soutenue) :

Programme finançant la recherche :

Situation actuelle du docteur (si la thèse est soutenue) :

Pourcentage de participation du directeur à l'encadrement en cas de co-direction : .....%

**Autre directeur proposé (éventuellement)\***

Nom - Prénom :

Corps :

**Adresse mail :**

Laboratoire :

Choix de cinq publications récentes :

**Autres personnes associées au comité de Direction de la Thèse :**

Pierre Excoffon (Service archéologique de la Ville de Fréjus) (p.excoffon@ville-frejus.fr)

Nuria Nin (Direction archéologique de la ville d'Aix-en-Provence) (NinN@mairie-aixenprovence.fr)

Cornelius Passchier (Univ. Mayence, Allemagne) (cpasschi@uni-mainz.de)